

PtX für nachhaltig erzeugtes Kerosin



@



Friedemann G. Albrecht, Ralph-Uwe Dietrich,
DLR e.V.

05. April 2017
Technologiezentrum Jülich



Wissen für Morgen



Gliederung

1. Motivation

- Entwicklung des globalen Flugverkehrs
- CO₂-Reduktionsziele und Maßnahmen
- Zertifizierte alternative Kraftstoffe

2. Herstellungsoptionen für alternatives Kerosin

- Herstellungspfade
- Rohstoffoptionen
- Technische Potentiale

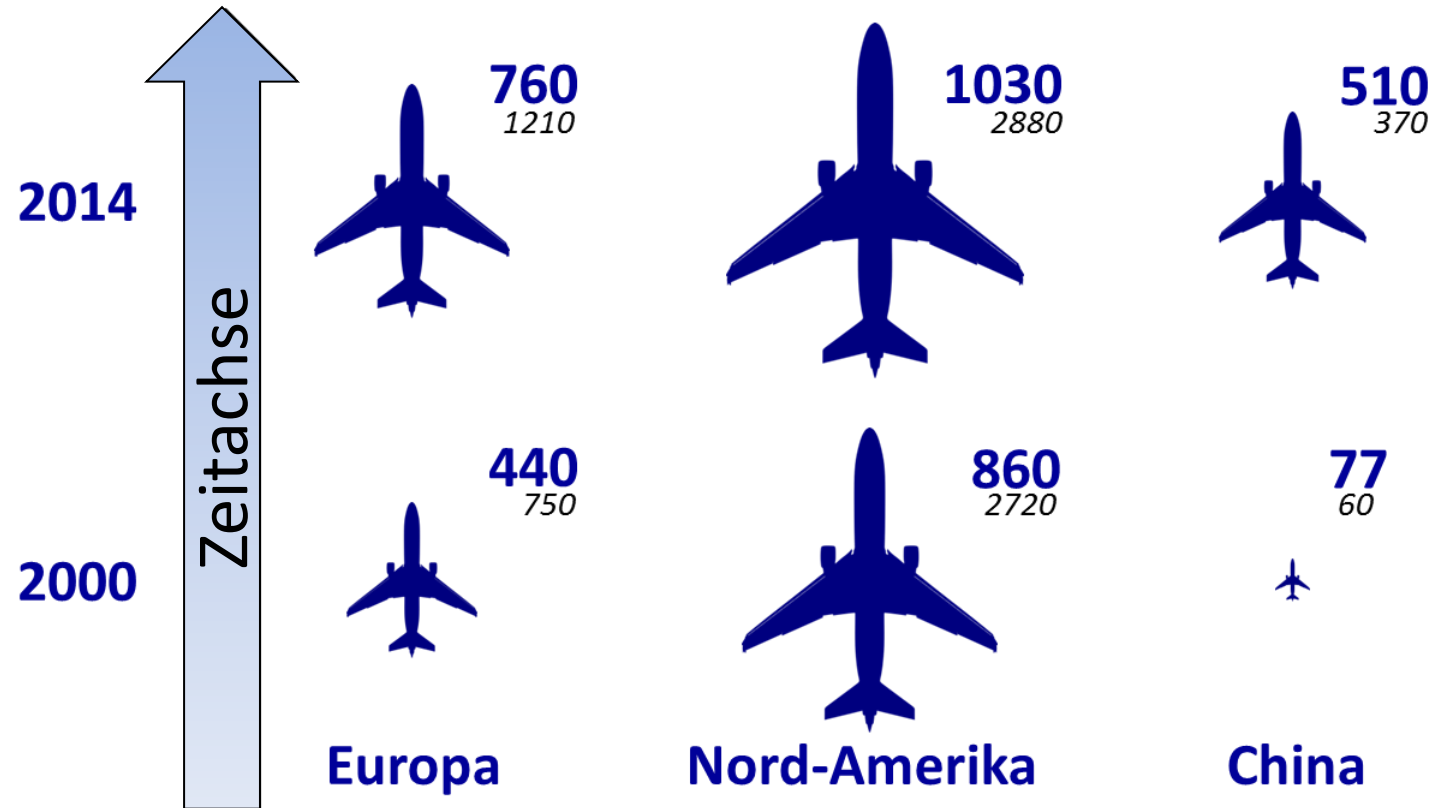
3. Herstellungskosten und CO₂-Vermeidungskosten

- Methodik der techno-ökonomischen Bewertung (TÖB) am DLR
- Ergebnisse am Beispiel von Fischer-Tropsch Kerosin

4. Zusammenfassung und Ausblick



1. Wachstumsbranche Luftverkehr



Mrd. Pkm/a (*kursiv: Pkm/a Kopf*)

Quelle: Thess et al., DGLR-Mitgliedermagazin „Luft- und Raumfahrt“ Ausgabe 2/2016, S.20 ff.

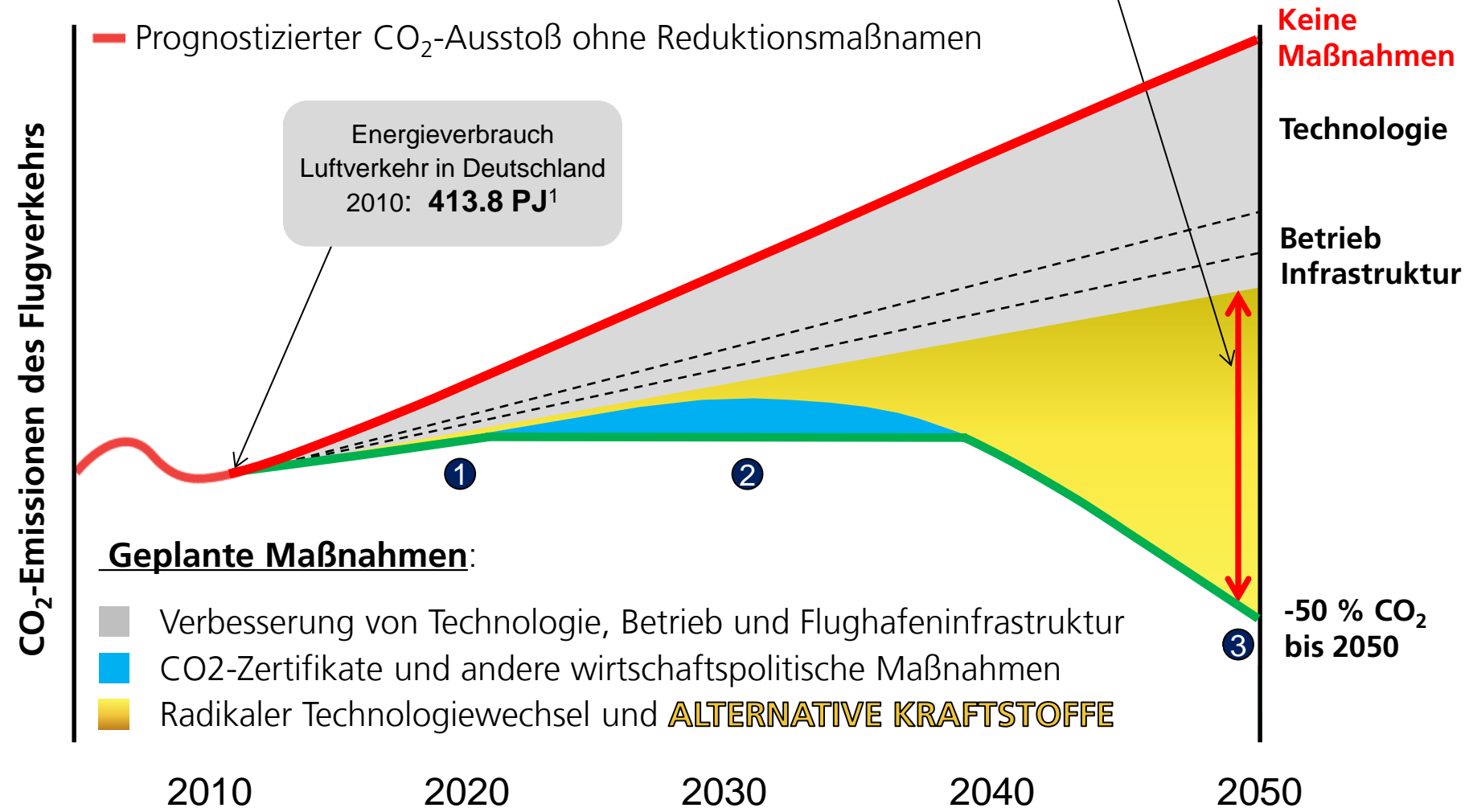
1. IATA Technology Roadmap

4. Edition, Juni 2013

Hauptziele:

- 1 Verbesserung der Brennstoffeffizienz um 1,5 % p.a. bis 2020
- 2 CO₂-neutrales Wachstum des Luftverkehrs ab 2020
- 3 Reduktion der CO₂-Emissionen um 50 % bis 2050 ggü. 2005

(optimistische) Annahme für 2050: Biokraftstoff 100% CO₂-„neutral“
 ≈ 460 PJ Biokraftstoff erforderlich (≈ 10.7 Mt Kerosinäquivalent)



1. Derzeitige Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)^[1]

Kraftstoff	Rohstoffe	Technisches Potential	Synthesetechnologie
Fischer-Tropsch (Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK))	Fossile Energieträger/ Biomasse/Strom/CO₂: Kohle, Erdgas, Biomasse, CO ₂ & H ₂ (aus EE-Strom)	Riesig	Vergasung/Elektrolyse + Fischer-Tropsch (FT) Synthese
HEFA (Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK))	Energiepflanzen: Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	gering	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)
Farnesan (Synthetische Iso-Paraffine)	Energiepflanzen: Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	gering	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)
AD-SPK (Alcohol-to-Jet)	Energiepflanzen: Bioethanol (-propanol, -butanol)	gering	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)

Einsatz von Gasen (Methan/Wasserstoff/ etc.) als Kraftstoff in der Luftfahrt auf lange Zeit nicht absehbar!

(Ausschlusskriterien: Sicherheit/Reichweite/Entwicklungskosten)



[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015



1. Derzeitige Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)^[1]

Kraftstoff	Rohstoffe	Technisches Potential	Synthesetechnologie
Fischer-Tropsch (Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK))	Fossile Energieträger/ Biomasse/Strom/CO₂: Kohle, Erdgas, Biomasse, CO ₂ & H ₂ (aus EE-Strom)	Riesig	Vergasung/Elektrolyse + Fischer-Tropsch (FT) Synthese
HEFA (Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK))	Energiepflanzen: Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	gering	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)
Farnesan (Synthetische Iso-Paraffine)	Energiepflanzen: Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	gering	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)
AD-SPK (Alcohol-to-Jet)	Energiepflanzen: Bioethanol (-propanol, -butanol)	gering	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)

Derzeitiger Forschungsschwerpunkt am DLR: Fischer-Tropsch-Kerosin aus Deutschland

- Im Industriemaßstab verfügbare kommerzielle Technologie
- **Breite** Rohstoffbasis: Synthesegas aus Stroh, Restholz, org. Abfälle, Industrieabgasen, ...
- Luftverkehr mit rein synthetischem Kerosin möglich ^[2]

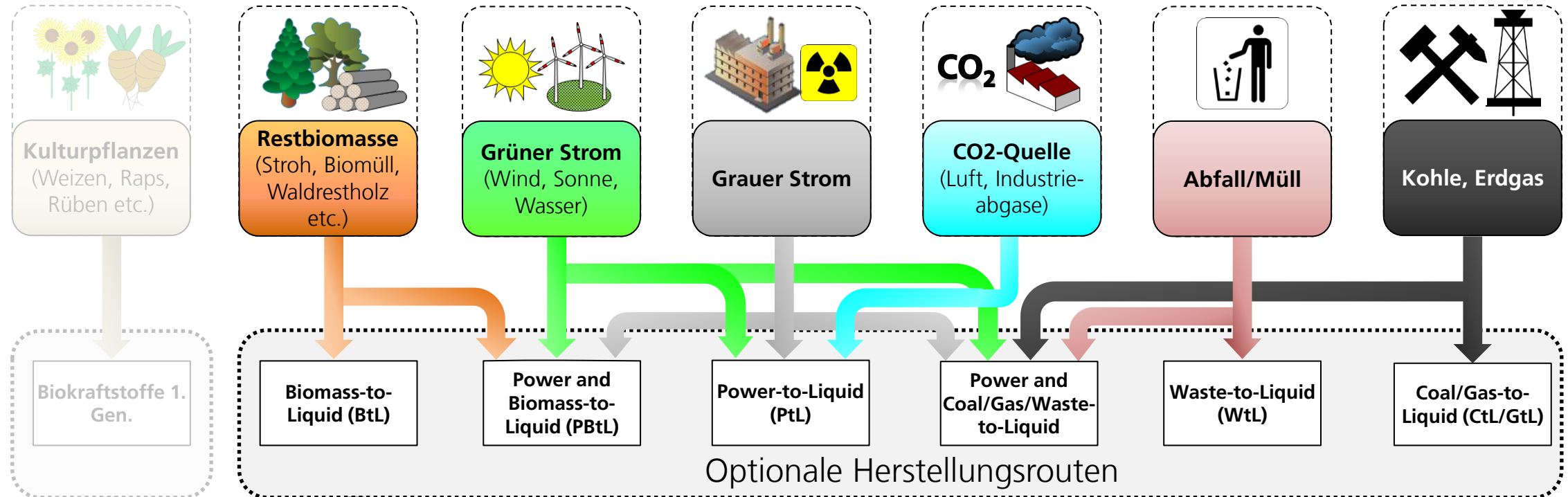
[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015

[2] UK Ministry of Defense, „DEF STAN 91-91: Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A-1“, UK Defense Standardization, 2011



2. Herstellungsoptionen für alternatives Kerosin

- ~~Berücksichtigung~~ **Geringes CO₂-Fußprint**



Bereitstellung großer Mengen von alternativen Kerosin mit geringem THG-Emissionspotenzial nur durch **Sektorkopplung** (Stromnetz – Kraftstoffmarkt) möglich (*ohne Biomasseimporte etc.*).

2. Technische Ausbaupotentiale

Annahme: X-to-Fuel Wirkungsgrad = 50 %, Kerosinverbrauch Deutschland (2010) ca. 420 PJ^{3,5}

<i>Erneuerbare Energiepotentiale in Deutschland [PJ/Jahr]</i>	<i>Potential</i>	<i>Kraftstoffausbeute</i>	<i>% Kraftstoffverbrauch (2014)³</i>
Wind Onshore ¹	1404	702	167 %
Wind Offshore ¹	929	464.5	111 %
Photovoltaik ¹	893	446.5	106 %
Biomasse ²	700	350	83 %
Total:	3926	1963	557 %

Annahme: Kohlenstoffumsatz = 98 %

<i>Kohlenstoffquelle [mio t/Jahr]</i>	<i>C</i>	<i>Kraftstoffausbeute</i>	<i>% Kraftstoffverbrauch (2014)³</i>
Energieversorgung ⁴ (CO ₂)	97.6	≈ 115	1094 %
Industrieabgase ⁴ (CO ₂)	46.1	≈ 54	519 %
Biomasse (Nur nichtgenutzte Restbiomasse) ²	12.9	≈ 15.2	147 %
Total:	156.6	184.2	1760 %
Luft (CO ₂)	unbegrenzt	unbegrenzt	>> 100 %
Kohle / Gas	>> Bedarf	>> Bedarf	>> 100 %

¹Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), „Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende,“ 2014.

²K. Bunzel et al., „Forstwirtschaftliche Biomassepotenziale und Reststoffpotenziale in Deutschland,“ Informationen zur Raumentwicklung, Bd. 5, pp. 297-308, 2011.

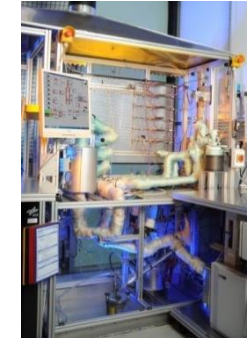
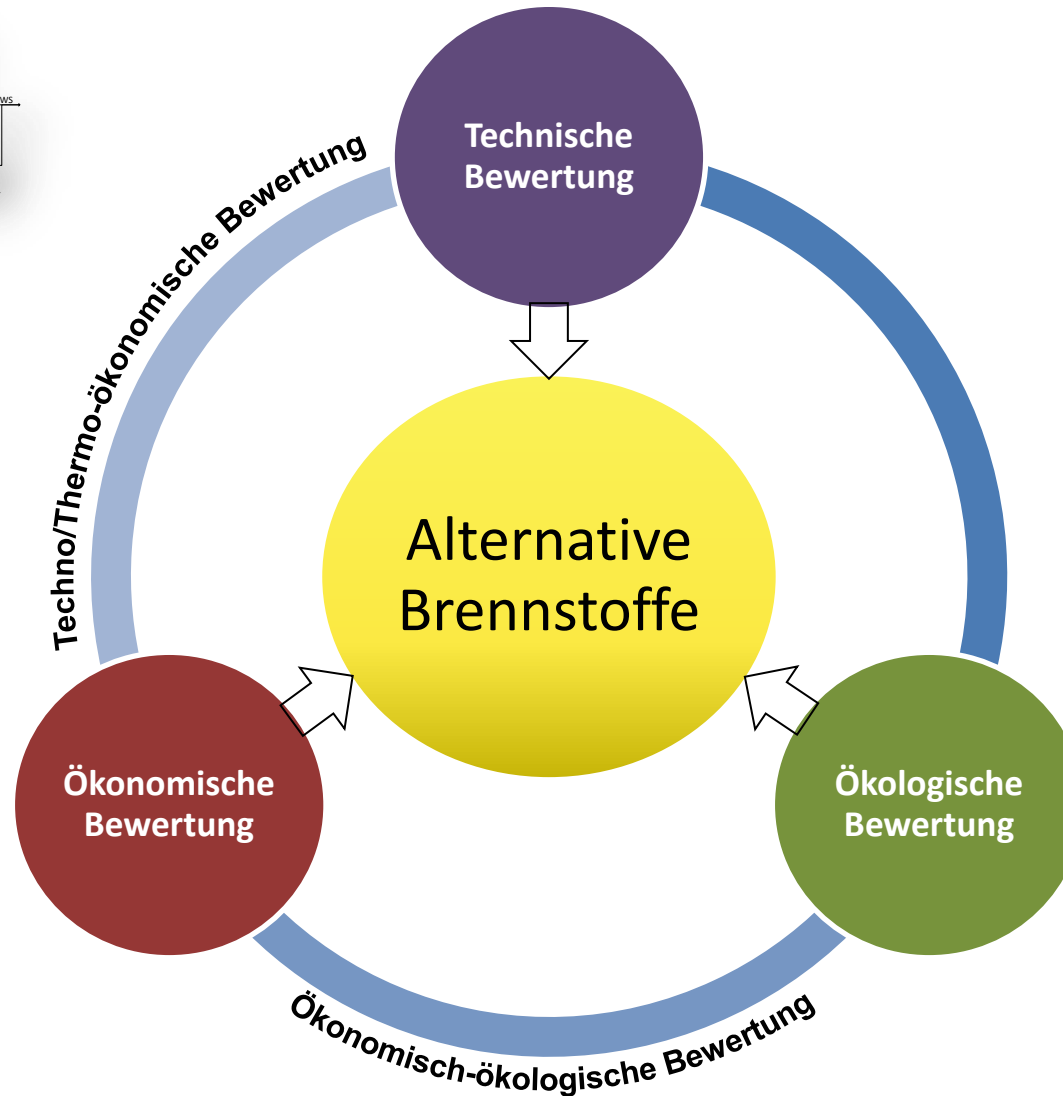
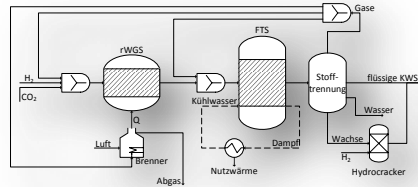
³AG Energiebillanzen, „Energiebillanz der Bundesrepublik Deutschland 2014,“ Stand 04.04.2016.

⁴Eurostat, „Datenbank - Luftemissionsrechnungen nach Branchen und für Haushalte (NACE Rev. 2) [env_ac_ainah_r2],“ 2016.

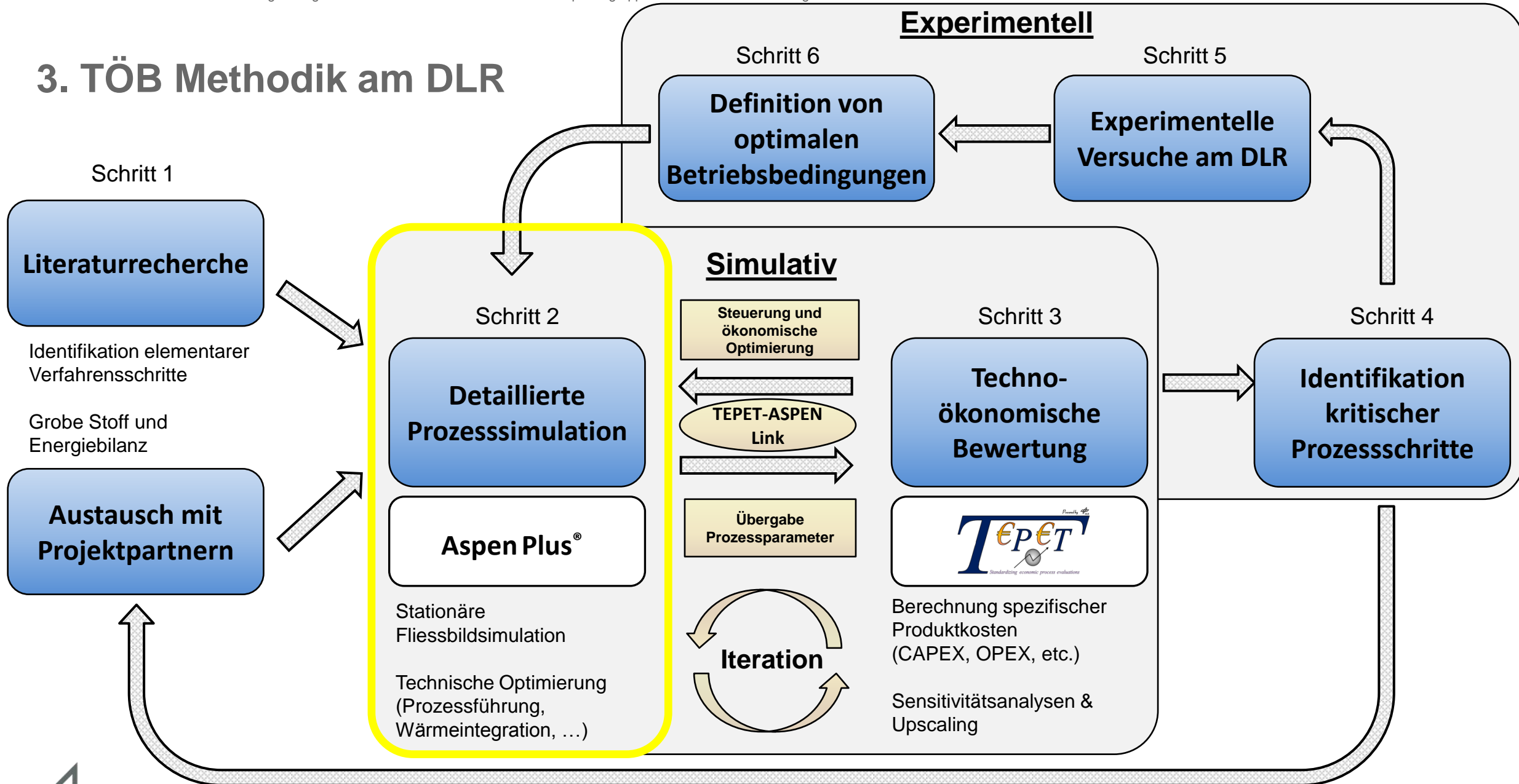
⁵Umweltbundesamt – Daten zum Verkehr (Ausgabe 2012)



3. Techno-ökonomische Prozessbewertung am DLR



3. TÖB Methodik am DLR

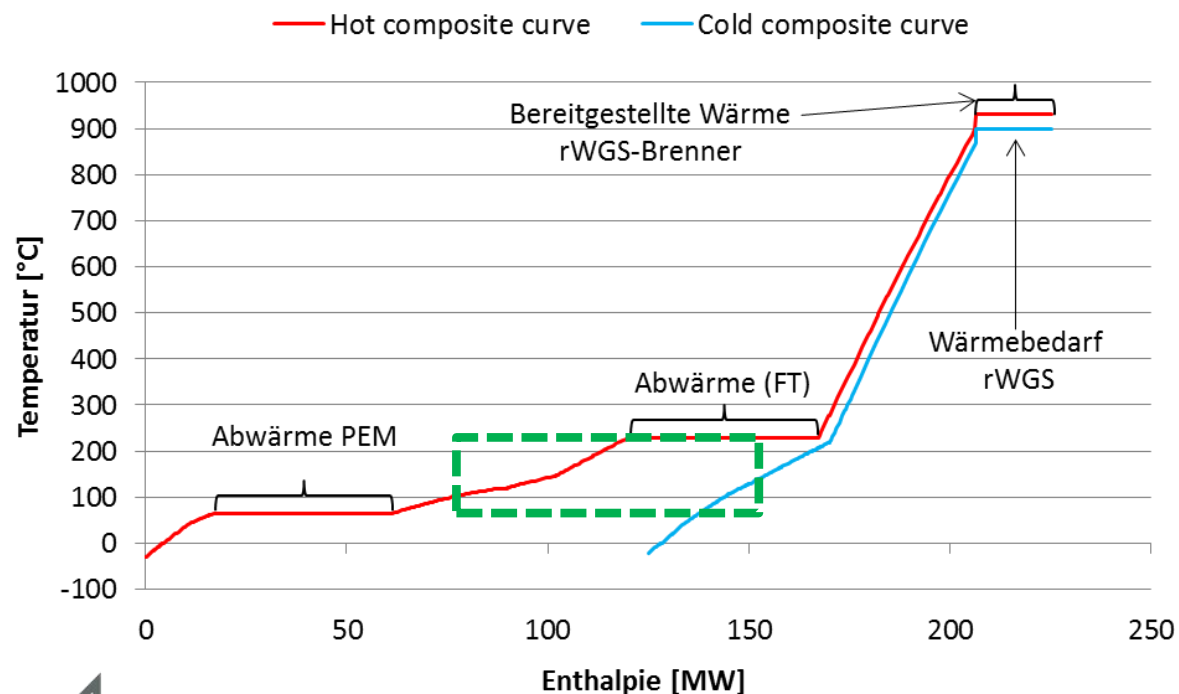


Verschiedene Technologieoptionen:



Wärmeintegration: Nutzung der Überschusswärme für CO₂-Abtrennung

- CO₂-Abscheidung aus Industrieabgasen
 - Wärmebedarf abhängig von Abscheidetechnologie
 - Typischer Temperaturbereich < 200 °C
 - Ausreichend Wärme aus Fischer-Tropsch Synthese vorhanden

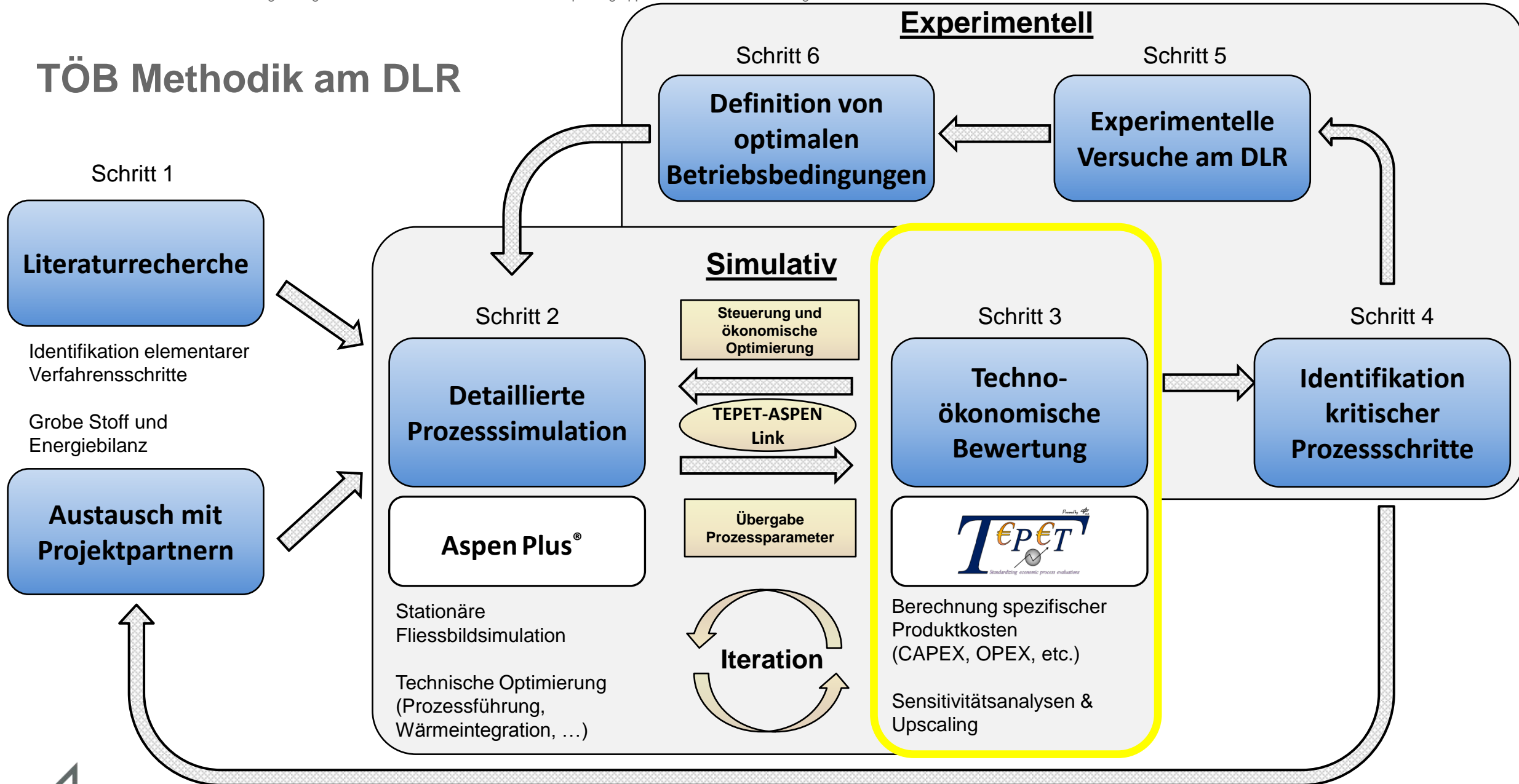


Bewertung vielversprechender Abscheidetechnologien

	MEA	aMDEA	aDEAE	K ₂ CO ₃	PCS
ΔH_{abs}	--	++	+	+++	+
Abs. rate	++	-	+	-	+
$\Delta\alpha$	o	-	+	+	++
Regenerability	--	+	+	o	+++
Degradation	---	++	++	+++	+
TRL	9	8	5	5	4

Ref.: (1) IEAGHG Steel, 2013; (2) IEAGHG Upgrade, 2014; (3) Shell, 2014; (4) IFP, 2012

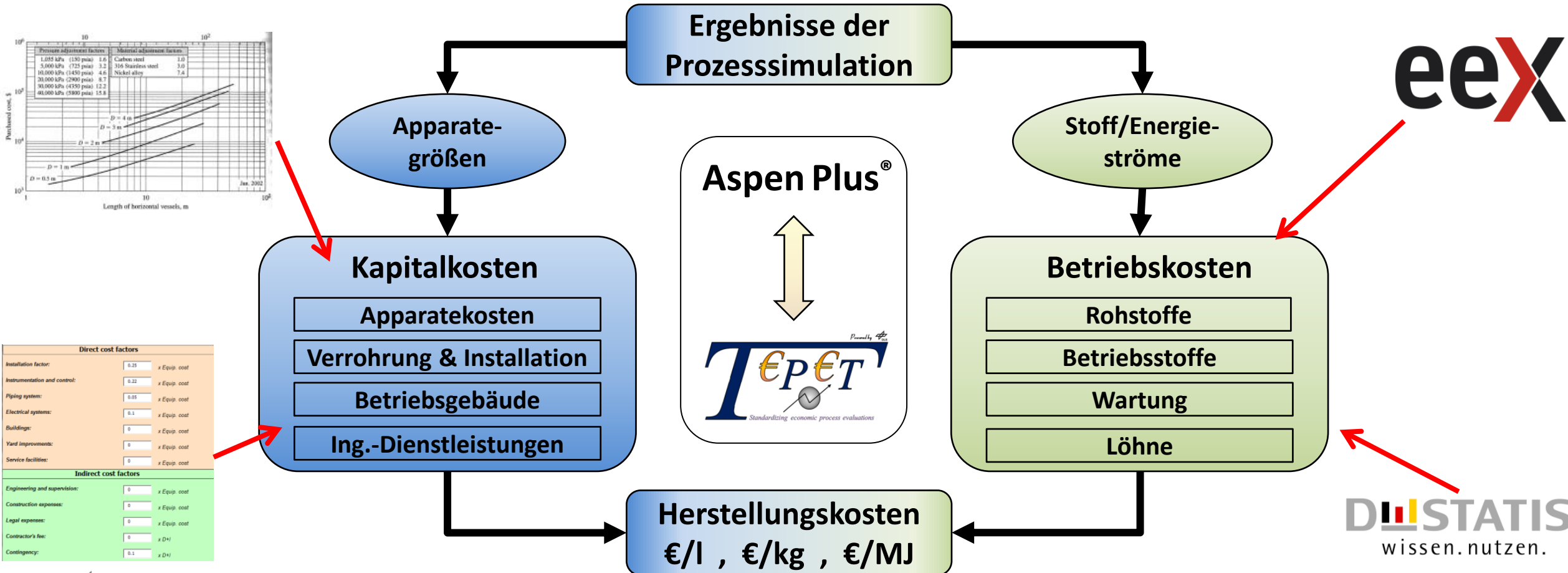
TÖB Methodik am DLR



Ökonomische Analyse: Standardisierte Methodik

AACE Recommended Practice Class III + IV

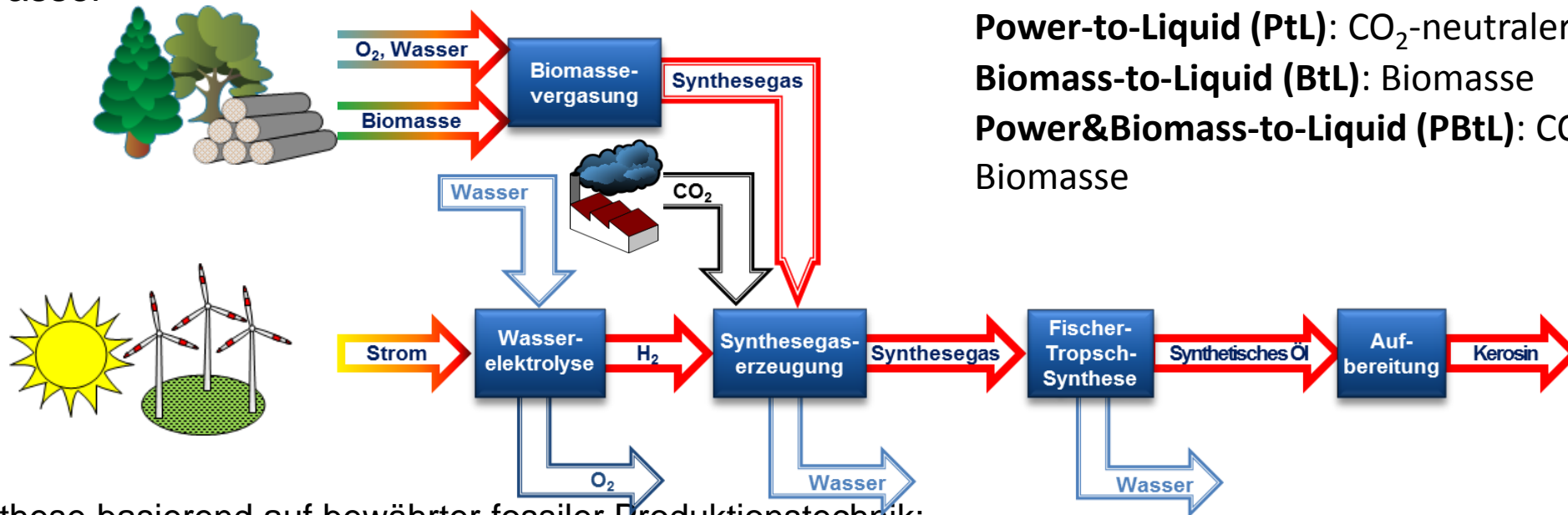
- Genauigkeit der Kostenschätzung $\pm 30\%$



Beispiel: Verfahrensoptionen für nachhaltiges FT-Kerosin

Rohstoffe:

- CO₂-neutraler Strom: Wind, PV, Solarkraftwerke
- „grünes“ CO₂: Abscheidung aus Luft bzw. Biomasse / „graues“ CO₂: Industrie
- Wasser



Synthese basierend auf bewährter fossiler Produktionstechnik:

- Secunda CTL (Sasol): 160.000 bpd (ca. 7 Mio.t/a)
- Pearl GTL (Qatar Petroleum + Shell): 140.000 bpd (ca. 6 Mio.t/a) – seit 2011

Randbedingungen für die Ermittlung der Herstellungskosten

Anlagengröße: **107 kt/a** (1 % des deutschen Kerosinbedarfs)

Investitionskosten:

PEM-Elektrolyseur: **640 €/kW** ^[1] (installierte Leistung)

Flugstromvergaser: **103.650 €/kg_{Slurry}/h** ^[2] (Scale-factor 0.7)

Rohstoffpreise:

Strom: **105 €/MWh** ^[3] (Industrielle Großabnehmer)

Biomasse (35% Restfeuchte): **97.4 €/t** ^[4]

Allgemeine ökonomische Annahmen:

Referenzjahr: 2015 *Anlagenbetrieb:* 30 Jahre

Betriebsstunden: 8,260 h/Jahr *Kapitalzins:* 7 %

[1] G. Saur, Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study, Technical Report NREL, 2008

[2] P. Kerdoncuff, Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation, Dissertation, KIT, Karlsruhe, 2008

[3] Eurostat, Preise Elektrizität für Industrieabnehmer in Deutschland, 2014

[4] C.A.R.M.E.N. – Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel (Energieholz-Index)



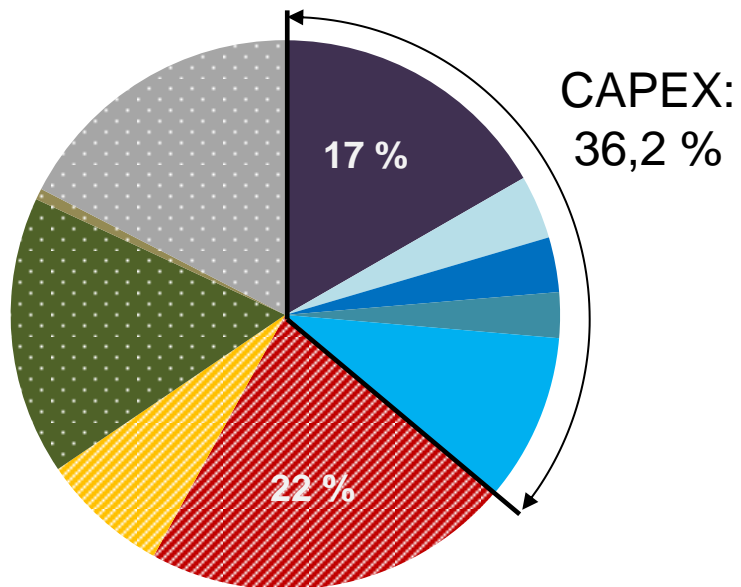
Ergebnis: Kostenvergleich PtL / BtL / PBtL

Anlagengröße: 107 kt/a (1 % des deutschen Kerosinbedarfs)



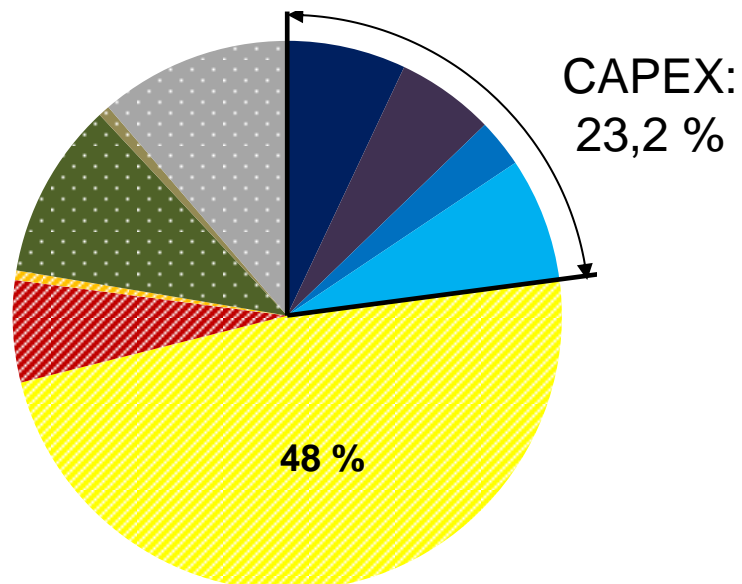
Biomass-to-Liquid (BtL)

Investment: ca. 1.384 mio. €
Kraftstoffkosten: ca. **1,91 €/l**



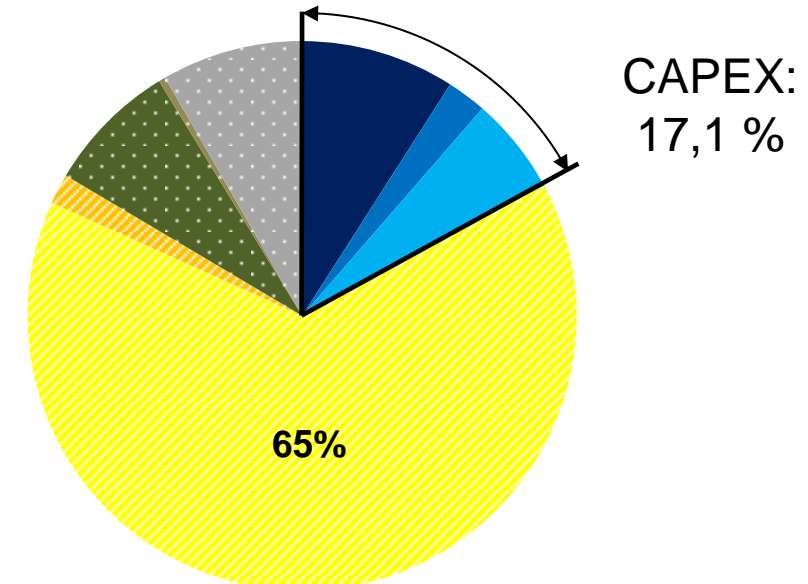
Power&Biomass-to-Liquid (PBtL)

Investment: ca. 1.001 mio. €
Kraftstoffkosten: ca. **2,36 €/l**



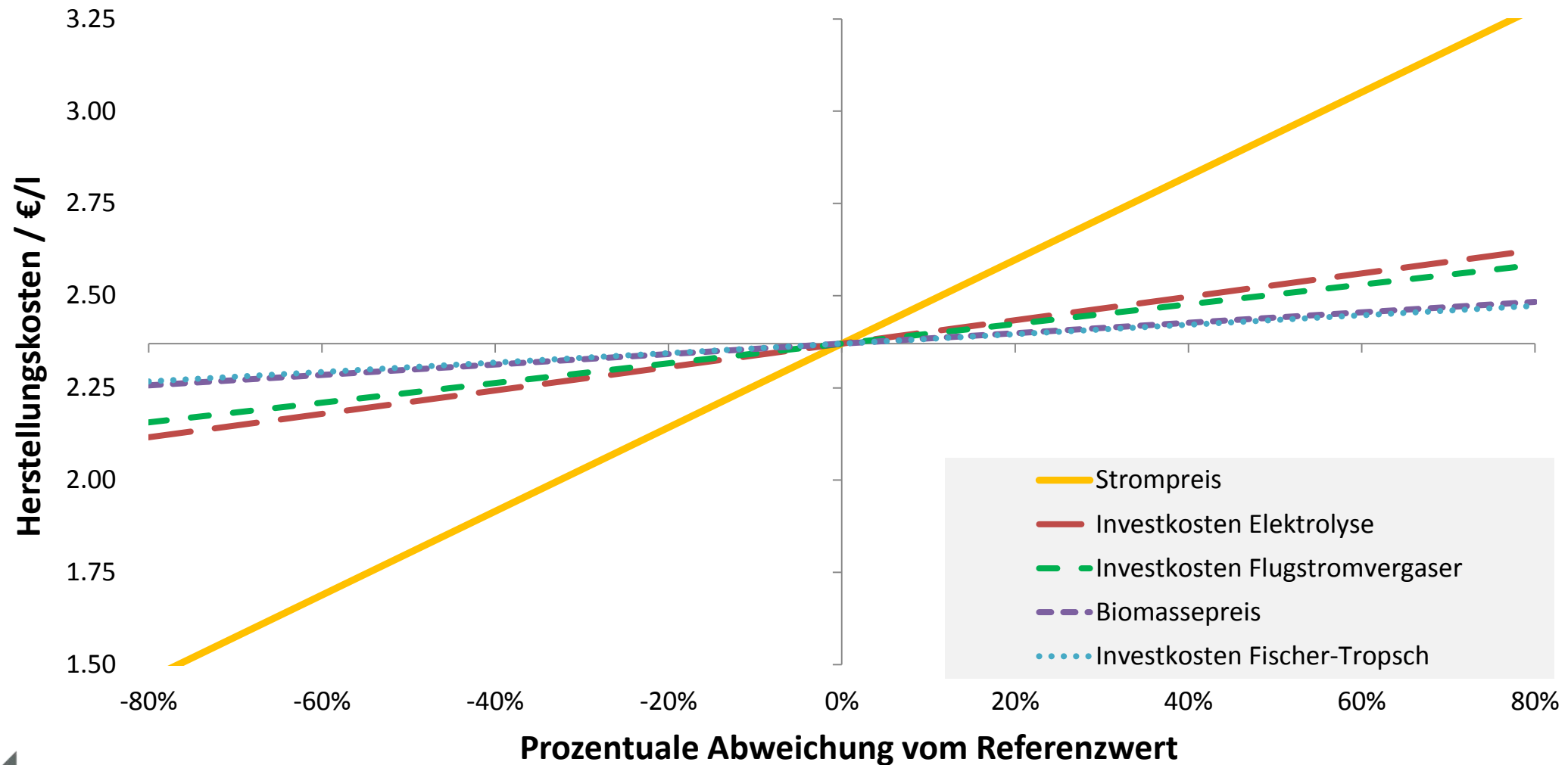
Power-to-Liquid (PtL)

Investment: ca. 906 mio. €
Kraftstoffkosten: ca. **2,86 €/l**



Ergebnis: Sensitivitätsanalyse

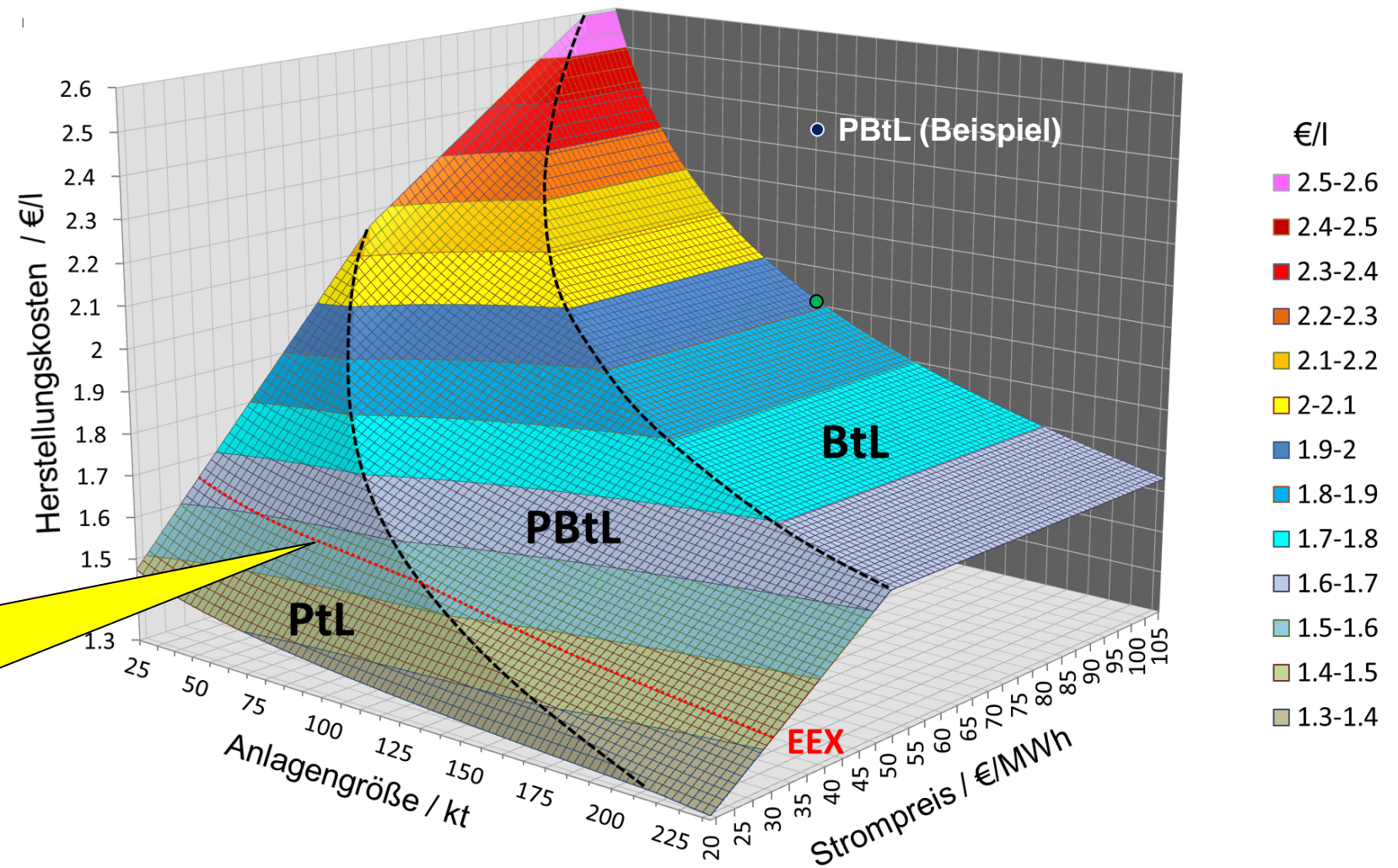
Beispiel: **PBTL – NPC = 2.36 €/l**



Ergebnis: Einfluss der Hauptannahmen auf Herstellungskosten

● PtL (Beispiel)

● PBtL (Beispiel)

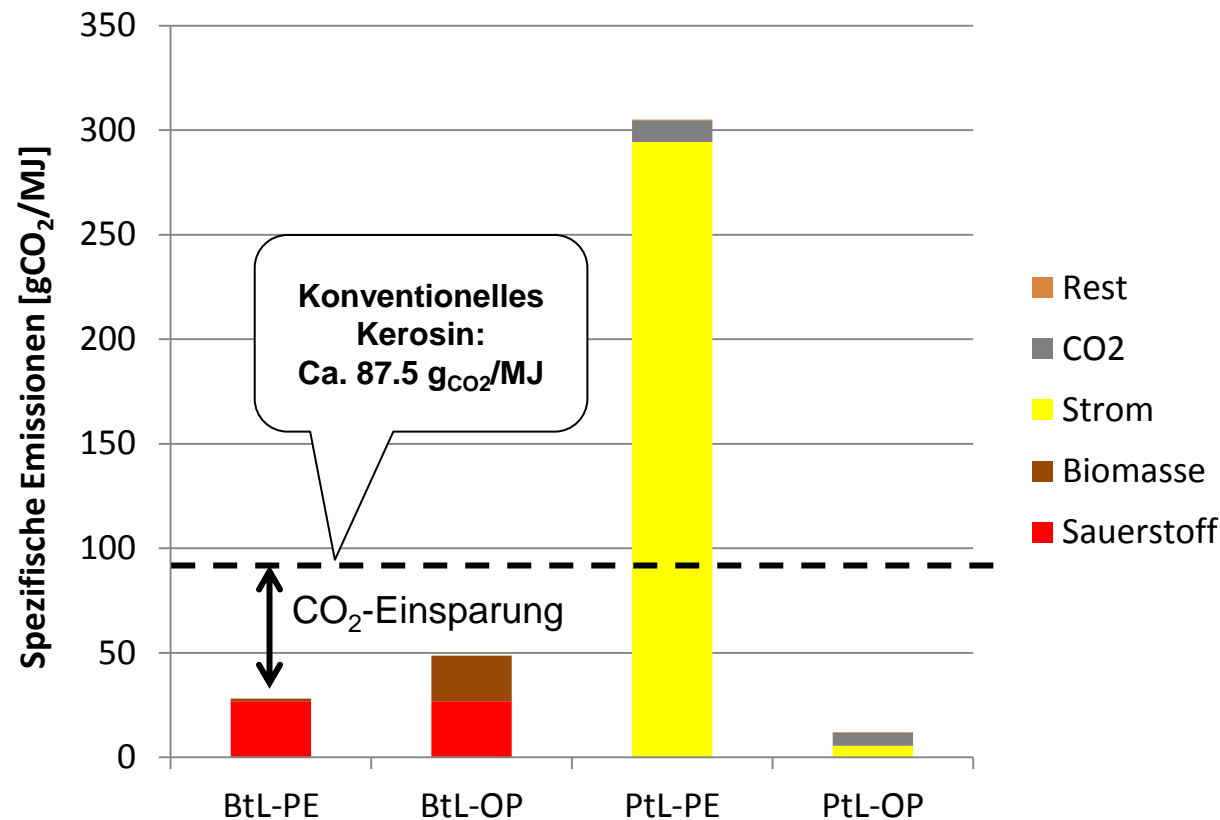


Beispiel:

Günstigste Herstellungskonzepte in Abhängigkeit der Anlagengröße und des Strompreises

**“Optimales”
Herstellungskonzept
abhängig von
Randbedingungen!**

Ergebnis: CO₂ Vermeidungskosten



Falldefinition:

BtL

Pessimistisch:

Standort: **Sigmaringen**
Einzugsgebiet: **5 km**
Biomasse: **Restholz**
Anlagengröße: **1,3 kt/a**
Biomassepreis: **100 €/t**

Optimistisch:

Standort: **Ravensburg**
Einzugsgebiet: **160 km**
Biomasse: **Stroh**
Anlagengröße: **131 kt/a**
Biomassepreis: **60 €/t**

PtL

Pessimistisch:

Stromquelle: **Netzstrom**
Anlagengröße: **1,3 kt/a**
CO₂-Quelle: **Kraftwerk**
Strompreis: **105 €/MWh**

Optimistisch:

Stromquelle: **Windstrom**
Anlagengröße: **131 kt/a**
CO₂-Quelle: **Zementwerk**
Strompreis: **30 €/MWh**

$$CO_2 - \text{Vermeidungskosten} \left[\frac{\text{€}}{t_{CO_2}} \right] = \frac{\text{Differenz der Herstellungskosten}}{CO_2 - \text{Einsparung}}$$

	BtL-PE	BtL-OP	PtL-OP
€/t _{CO₂}	2680	755	375

Rohstoff-/Investitionsbedarf für 1 % des deutschen Kerosinbedarfs (107 kt/a)

Rohstoff & Energiebedarf:

107 kt/a	BtL	PBtL	PtL
Strom / TWh	- 0,45	1,59	2,59
Elektrolyse / MW	-	200	315
CO ₂ / kt	-	-	331
Biomasse / kt	803	212,9	-

Vergleichsgröße
Abgeregelt EEG-Strom (2015) : 4.7 TWh ¹
Zubau Wind (2015): ≈ 20 TWh ¹
< 1 % der Industrieabgase in DE ²
Holzpelletverbrauch DE (2016): 2.000 kt/a ³

Erfordernisse für erneuerbares Kerosin aus Deutschland

- massiver Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung
- Technologieentwicklung für Elektrolyse, Fischer-Tropsch, etc.
- Investitionen in Produktion, Verarbeitung und Distribution

[1] Bundesnetzagentur, „EEG in Zahlen,“ 2016

[2] Eurostat, „Datenbank - Luftemissionsrechnungen nach Branchen und für Haushalte (NACE Rev. 2) [env_ac_ainah_r2],“ 2016.

[3] Statista, „Pelletproduktion in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2016,“ 2016[4] C.A.R.M.E.N. – Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel (Energieholz-Index)



Zusammenfassung

- Dekarbonisierung der Luftfahrt erfordert flüssiges, alternatives Kerosin
- Große Mengen von alternativen Kerosin nur über die Sektorkopplung darstellbar
- PtX (PtL/BtL/PBtL-Technologien) sind luftfahrttauglich – aber derzeit nicht wirtschaftlich, Potenzial rein landwirtschaftlich basierter Kraftstoffe begrenzt
- Wesentliche Kostensenkungspotenziale für synthetische Flugtreibstoffe aus Ökostrom:
1. Strompreis, 2. Elektrolyseeffizienz und –kosten, 3. Kohlenstoffquelle
- Das DLR verfügt über ein standardisiertes und automatisiertes techno-ökonomisches Bewertungstool TEPET, welches auch für andere Verfahrenskonzepte (Power-to-Gas etc.) angewendet werden kann.



Ausblick

- Anwendung der Methodik der techno-ökonomischen Bewertung auf bodengebundenen Transport und Chemieindustrie
- Merit-Order von alternativen Kraftstoffen (Herstellungskosten, CO₂-Vermeidungskosten, etc.)
- Potentialanalyse für Multiprodukt PtX-Konzepte (Diesel, Kerosin, Methan, Grundchemikalien, etc.)
- Bewertung und Optimierung von lastflexiblen/dynamischen PtX-Konzepten
- Experimentelle Validierung von kritischen Prozessschritten in PtX-Konzepten



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Friedemann G. Albrecht
Fachgebiet Alternative Brennstoffe
Institut für Technische Thermodynamik
Stuttgart

friedemann.albrecht@dlr.de
Tel.: 0711 / 6862-232



Wissen für Morgen

